



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 197 27 404 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁸:
G 01 J 9/02
G 01 B 9/02
G 01 N 21/41
G 01 N 21/45

②1 Aktenzeichen: 197 27 404.8
②2 Anmeldetag: 27. 6. 97
④3 Offenlegungstag: 26. 2. 98

DE 197 27 404 A 1

③0 Unionspriorität:

08/700.113 20.08.96 US

⑦1 Anmelder:

Zygo Corp., Middlefield, Conn., US

⑦4 Vertreter:

G. Koch und Kollegen, 80339 München

⑦2 Erfinder:

Hill, Henry Allen, Tucson, Ariz., US; Groot, Peter de, Middletown, Conn., US

⑤4 Überlagerungsverfahren und Vorrichtung zur Messung des Brechungsindex von Luft unter Benutzung der Mehrfach-Interferometrie

- ⑤7 Ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Messung von Fluktuationen im Brechungsindex eines Gases, beispielsweise Luft, in einem Meßpfad können benutzt werden, um die Versetzung eines Gegenstandes unabhängig von diesen Fluktuationen zu messen. Eine kohärente Lichtquelle liefert zwei Quellenlichtstrahlen mit Quellenwellenlängen längs des Meßpfades, die im wesentlichen harmonisch aufeinander bezogen sind. Die Strahlen durchlaufen den Meßpfad mehrfach, wobei die Zahl der Durchläufe für die jeweiligen Lichtstrahlen harmonisch bezogen ist, wobei die Beziehung der Harmonischen im wesentlichen die gleiche ist wie die im wesentlichen harmonische Beziehung zwischen den Wellenlängen, um heterodyne Phasenverschiebungen, basierend auf den Quellenwellenlängen, und der Zahl der Durchläufe über den Meßpfad, um eine superheterodyne Modulationsphase zu erzeugen, die im wesentlichen unempfindlich gegenüber einer Bewegung längs des Meßpfades ist.

1

DE 197 27 404 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 01. 98 702 069/514

17/25

THIS PAGE BLANK (USPTO)

Beschreibung

Technisches Gebiet der Erfindung

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf optische Instrumente zur Messung des Abstands und des Brechungsindex. Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf eine interferometrische Abstandsmessung unabhängig von Fluktuationen im Brechungsindex eines Gases im Meßpfad.

Hintergrund und Stand der Technik

Ein häufig in der Metrologie anzutreffendes Problem ist die Messung des Brechungsindex einer Luftsäule. Es gibt die verschiedensten Techniken zur Messung des Brechungsindex unter genau kontrollierten Umständen, wenn beispielsweise die Luftsäule in einer Probenzelle angeordnet und im Hinblick auf Temperatur, Druck und physikalische Abmessung überwacht wird. In diesem Zusammenhang wird beispielsweise auf den Artikel "An air refractometer for interference length metrology" von J. Terrien in: Metrologia 1(3), 80—83 (1965), verwiesen.

Vielleicht die schwierigste Messung, die sich auf den Brechungsindex von Luft bezieht, ist die Messung von Indexfluktuationen über einem Meßpfad unbekannter oder variabler Länge, wo Temperatur und Druck nicht gesteuert sind. Derartige Umstände treten häufig in geophysikalischen und meteorologischen Überwachungs- vorrichtungen auf, wo die Atmosphäre offensichtlich unkontrolliert ist und der Brechungsindex sich dramatisch infolge von Änderungen der Luftdichte und Luftzusammensetzung verändern kann. Dieses Problem ist in dem folgenden Artikel beschrieben: "Effects of the atmospheric phase fluctuation on longdistance measurement" von H. Matsumoto und K. Tsukahara in: Appl. Opt. 23(19), 3388—3394 (1984), sowie in dem Artikel "Optical path length fluctuation in the atmosphere" von G. N. Gibson et al. in: Appl. Opt. 23(23), 4383—4389 (1984).

Eine weitere beispielshafte Situation ist die hochpräzise Abstandsmessungs-Interferometrie, wie diese für mikrolithographische Herstellung integrierter Schaltungen benutzt wird. In diesem Zusammenhang wird auf den folgenden Artikel Bezug genommen: "Residual errors in laser interferometry from air turbulence and non-linearity" von N. Bobroff in: Appl. Opt. 26(13), 2676—2682 (1987), sowie auf den Artikel "Recent advances in displacement measuring interferometry", von N. Bobroff in: Measurement science & tech. 4(9), 907—926 (1993). Im typischen Fall liegt die Korrektur für Indexfluktuationen in der Größenordnung von 0,1 ppm (parts per million) in der Größe und muß eine Genauigkeit von 0,005 ppm haben. Diese hohen Präzisionserfordernisse benötigen frequenzstabilisierte Laserquellen und eine hochauflösende Phasendetektion.

Es gibt häufig Referenzen im Stande der Technik im Hinblick auf heterodyne Verfahren der Phasenabschätzung, bei denen die Phase sich zeitlich auf nicht kontrollierbare Weise ändert. Beispielsweise sendet bei einem bekannten Überlagerungs-Entfernungsmeß-Interferometer die Quelle zwei orthogonal polarisierte Strahlen aus, die etwas unterschiedliche optische Frequenzen (beispielsweise 2 MHz) aufweisen. Der interferometrische Empfänger besteht in diesem Fall aus einem linearen Polarisator und einem Photodetektor, um das sich zeitlich ändernde Interferenzsignal zu messen. Das Signal schwingt mit der Schwebungsfrequenz, und die Phase des Signals entspricht der relativen Phasendifferenz. Ein weiteres repräsentatives Beispiel des Standes der Technik bei der Überlagerungs-Distanzmeß-Interferometrie findet sich in der US-A-4 688 940. Diese bekannten Ausbildungen der interferometrischen Metrologie sind beschränkt auf Fluktuationen im Brechungsindex und in sich ungeeignet für die nächste Generation mikrolithographischer Instrumente.

Eine weitere bekannte Form eines Interferometers zur Abstandsmessung ist in der US-A-4 005 936 beschrieben. Das Verfahren besteht darin, Laserstrahlen mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen zu benutzen, von denen jeder in zwei Teile aufgespalten wird. In den einen Teil der jeweiligen Strahlen wird eine Frequenzverschiebung eingeführt. Ein Teil eines jeden Strahls wird von einem Gegenstand reflektiert und mit dem anderen Teil auf einem Photodetektor wieder kombiniert. Aus dem Interferenzsignal des Detektors wird eine Differenzfrequenz abgeleitet, deren Phase ein Maß für den Abstand nach der Oberfläche ist. Die äquivalente Wellenlänge der Phase, die der Differenzfrequenz zugeordnet ist, ist gleich dem Produkt von den beiden Laserwellenlängen geteilt durch die Differenz der beiden Wellenlängen. Diese Zwei-Wellenlängen-Technik vermindert Meßfehler, aber sie ist wenigstens ebenso empfindlich gegenüber störenden Effekten von Indexfluktuationen der Luft wie die Einzel-Wellenlängen-Technik.

Ein weiteres Beispiel eines Zwei-Wellenlängen-Interferometers gemäß der obengenannten US-PS ist in der US-A-4 907 886 beschrieben. Dieses System ist auch in dem folgenden Artikel veröffentlicht: "Two-wavelength laser interferometry using superheterodyne detection" von R. Dändliker, R. Thalmann und D. Prongue in: Opt. Let. 13(5), 339—341 (1988), und weiter in dem Artikel "High-accuracy distance measurements with multiple-wavelength interferometry" von R. Dändliker, K. Hug, J. Politz und E. Zimmermann. Das System von Dändliker et al., wie dies in der US-A-4 907 886 beschrieben ist, benutzt Laserstrahlen mit zwei Wellenlängen, wobei jeder Strahl zwei Polarisationskomponenten aufweist, die in ihrer Frequenz durch eine akusto-optische Modulation getrennt sind. Nachdem diese Strahlen colinear durch ein Michelson-Interferometer hindurchgetreten sind, werden die Polarisationskomponenten gemischt, was zu einem Überlagerungssignal führt, wobei das Überlagerungssignal eine unterschiedliche Frequenz für jede der beiden Wellenlängen besitzt, und daraus resultiert ein sogenanntes Super-Heterodyne-Signal mit einer Frequenz gleich der Differenz der Überlagerungsfrequenzen und eine Phase, die einer äquivalenten Wellenlänge zugeordnet ist, die gleich ist dem Produkt der beiden Laserwellenlängen dividiert durch die Differenz der beiden Wellenlängen. Gemäß der US-A-4 907 886 wird angenommen, daß die Phase des super-heterodynischen Signals nur von der Lage eines Meßobjektes und der äquivalenten Wellenlänge abhängt. Daher ist dieses System auch nicht geeignet zur Messung oder Kompensation von Fluktuationen im Brechungsindex der Luft.

THIS PAGE BLANK (CSPIC)

Weitere Beispiele der Zwei-Wellenlängen-Überlagerungs-Technik finden sich in einem Artikel unter der Bezeichnung "Two-wavelength double heterodyne interferometry using a matched grating technique" von Z. Sodnik, E. Fischer, T. Ittner und H. J. Tiziani in: Appl. Opt. 30(22), 3139—3144 (1991), und in einem Artikel unter dem Titel "Diode laser and fiber optics for dual-wavelength heterodyne interferometry" von S. Manhart und R. Maurer in: SPIE 1319, 214—216 (1990). Keines dieser Beispiele ist jedoch auf das Problem der Indexfluktuationen gerichtet. 5

Aus dem vorstehenden kann geschlossen werden, daß der Stand der Technik auf dem Gebiet der heterodynen und superheterodynen Interferometrie kein Verfahren und keine Mittel zur Messung und Kompensation der Fluktuation des Brechungsindex der Luft aufzeigt. Dieser Mangel beim Stande der Technik führt zu einer beträchtlichen Meßungewißheit, wodurch die Präzision der Systeme schwerwiegend beeinträchtigt wird, die derartige Interferometer beispielsweise bei der mikrolithographischen Herstellung integrierter Schaltkreise benutzen. Zukünftige Interferometer werden notwendigerweise ein erfindungsgemäßes neues Verfahren und Mittel aufweisen müssen, um Fluktuationen des Brechungsindex zu messen und zu kompensieren. 10

Eine Möglichkeit, um Indexfluktuationen festzustellen, ist die Messung von Druckänderungen und Temperaturänderungen längs des Meßweges und die Berechnung ihrer Auswirkung auf den Brechungsindex des Pfades. Mathematische Gleichungen zur Durchführung dieser Berechnung sind in einem Artikel unter der Bezeichnung "The refractivity of air" von F. E. Jones in: J. Res. NBS 86(1), 27—32 (1981), beschrieben. Eine Weiterentwicklung der Technik ist in einem Artikel unter der Bezeichnung "High-accuracy displacement interferometry in air" von W. T. Estler in: Appl. Opt. 24(6), 808—815 (1985), beschrieben. Leider liefert diese Technik nur angenäherte Werte und ist mühsam in der Anwendung, und es werden nur langsame globale Fluktuationen in der Luftdichte korrigiert. 15 20

Eine weitere mehr direkte Möglichkeit zur Feststellung von Indexfluktuationen über einen Pfad ist die Mehrfach-Wellenlängen-Distanzmessung. Das Grundprinzip ist das folgende: Interferometer und Laser-Radarmessungen der optischen Pfadlänge zwischen einem Bezugspunkt und einem Gegenstand erfolgen oft in der offenen Luft. Die optische Pfadlänge ist das integrierte Produkt des Brechungsindex und des physikalischen Pfades, der vom Meßstrahl durchlaufen wird. Insofern ändert sich der Brechungsindex mit der Wellenlänge, aber die physikalische Pfadlänge ist unabhängig von der Wellenlänge. Daher ist es allgemein möglich, die physikalische Pfadlänge von den Fluktuationen im Brechungsindex zu trennen, vorausgesetzt, daß das Instrument wenigstens zwei Wellenlängen benutzt. Die Änderung des Brechungsindex mit der Wellenlänge ist als Dispersion bekannt, und daher wird diese Technik im folgenden als Dispersionstechnik bezeichnet. 25 30

Die Dispersionstechnik zur Indexmessung hat eine lange Geschichte und liegt vor der Einführung des Laser. In einem Artikel "Long-path interferometry through an uncontrolled atmosphere" von K. E. Erickson in: J. Opt. Soc. Am. 52(7), 781—787 (1962), werden die Grundprinzipien beschrieben, und er liefert eine Analyse der Möglichkeit dieser Technik für geophysikalische Messungen. Weitere theoretische Vorschläge finden sich in einem Artikel "Correction of optical distance measurements for the fluctuating atmospheric index of refraction" von P. L. Bender und J. C. Owens in: J. Geo. Res. 70(10), 2461—2462 (1965). 35

Kommerzielle Distanzmeßvorrichtungen auf Laser-Radar-Basis mit Dispersionstechnik zur Indexkompensation erschienen in den siebziger Jahren. Ein Artikel "Two-laser optical distance-measuring instrument that corrects for the atmospheric index of refraction" von K. B. Earnshaw und E. N. Hernandez in: Appl. Opt. 11(4), 749—754 (1972), beschreibt ein Instrument, welches durch Mikrowellen modulierte HeNe- und HeCd-Laser verwendet, die über einen Meßpfad von 5 bis 10 km arbeiten. Weitere Einzelheiten dieses Instruments finden sich in einem Artikel "Field Tests of a two-laser (4416A and 6328A) optical distance-measuring instrument correcting for the atmospheric index of refraction" von E. N. Hernandez und K. B. Earnshaw in: J. Geo. Res. 77(35), 6994—6998 (1972). Weitere Beispiele von Anwendungen der Dispersionstechnik sind in einem Artikel diskutiert, der wie folgt lautet: "Distance corrections for single- and dual-color lasers by ray tracing" von E. Berg und J. A. Carter in: J. Geo. Res. 85(B11), 6513—6520 (1980), und in einem Artikel mit der Bezeichnung "A multi-wavelength distance-measuring instrument for geophysical experiments" von L. E. Slater und G. R. Huggett in: J. Geo. Res. 81(35), 6299—6306 (1976). 40 45

Obgleich die Instrumente für geophysikalische Messungen im typischen Fall ein intensitätsmoduliertes Laser-Radar benutzen, ist es klar, daß die optische Interferenzphasendetektion für kürzere Entfernungen zweckmäßiger ist. In der US-A-3 647 302 mit der Bezeichnung "Apparatus for and method of obtaining precision dimensional measurements" (1972) ist ein interferometrisches Versetzungsmeßsystem beschrieben, welches Mehrfach-Wellenlängen benutzt, um Änderungen der Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Druck zu kompensieren. Das Instrument ist speziell zur Arbeitsweise in Verbindung mit einem beweglichen Objekt ausgebildet, d. h. mit einer veränderlichen physikalischen Pfadlänge. Diese Phasendetektion ist jedoch unzulänglich genau für hochpräzise Messungen. 50 55

Ein moderneres und detailliertes Beispiel ist das System, das von Y. Zhu, H. Matsumoto und T. Ohshi in einem Artikel beschrieben wird unter dem Titel "Long-arm two-color interferometer for measuring the change of air refractive index" in: SPIE 1319. Optics in complex systems, 538—539 (1990). Das System von Zhu et al. benutzt einen 1064 nm-Wellenlängen-YAG-Laser und einen 632 nm-HeNe-Laser zusammen mit einer Gegenphasendetektion. Im wesentlichen das gesamte Instrument wurde in Japanisch in einem früheren Artikel von Zhu et al. beschrieben mit dem Titel "Measurement of atmospheric phase and intensity turbulence for long-path distance interferometer". Proc. 3rd meeting on lightwave sensing technology, in: Appl. Phys. Soc. of Japan, 39 (1989). Jedoch besitzt das Interferometer von Zhu et al. eine unzureichende Auflösung für alle Anwendungen, d. h. eine Sub-Mikron-Interferometrie für Mikrolithographie. 60 65

Ein neuerer Versuch einer hochpräzisen Interferometrie für die Mikrolithographie findet sich in der US-PS 4 948 254 von A. Ishida (1990). Eine ähnliche Vorrichtung wird von Ishida in einem Artikel beschrieben "Two wavelength displacement-measuring interferometer using second-harmonic light to eliminate air-turbulence-in-

duced errors" in: Jpn. J. Appl. Phys. 28(3), L473—475 (1989). In dem Artikel wird ein eine Versetzung messendes

Interferometer beschrieben, welches die Fehler eliminiert, die durch Fluktuationen im Brechungsindex verursacht wurden, und zwar erfolgt dies durch eine Zwei-Wellenlängen-Dispersionsdetektion. Ein Ar^+ -Laser liefert
5 beide Wellenlängen gleichzeitig über einen Frequenzverdopplerkristall, welcher allgemein als BBO bezeichnet wird. Die Benutzung eines BBO-Verdopplungskristalls resultiert in zwei Wellenlängen, die grundsätzlich phasenstarr sind. Dadurch wird die Stabilität und die Genauigkeit der Brechungsindexmessung beträchtlich verbessert. Die Phasendetektormittel, die einfache homodyne Gegenphasendetektion benutzen, sind jedoch unzureichend für hochauflösende Phasenmessungen. Außerdem sind die Mittel zur Phasendetektion und zur Signalverarbeitung
10 nicht für dynamische Messungen geeignet, bei denen die Bewegung des Gegenstandes zu rapiden Veränderungen der Phase führt, die schwierig genau festzustellen sind.

In der US-PS 5 404 222 ist unter dem Titel "Interferometric measuring system with air turbulence compensation" ein Zwei-Wellenlängen-Interferometer beschrieben, das die Dispersionstechnik benutzt, um Indexfluktuationen festzustellen und zu kompensieren. Eine ähnliche Vorrichtung wird von S. A. Lis in einem Artikel
15 beschrieben "An air turbulence compensated interferometer for IC manufacturing" in: SPIE 2440 (1995). Eine Verbesserung des US-Patents 5 404 222 findet sich in der US-PS 5 537 209. Die prinzipielle Neuerung dieses Systems gegenüber jenem, das von Ishida in Jpn. J. Appl. Phys. (oben erwähnt) vorgeschlagen wurde, ist der Zusatz eines weiteren BBO-Verdopplungskristalls, um die Präzision des Phasendetektors zu verbessern. Das zusätzliche BBO-Kristall macht es möglich, optisch zwei Strahlen zur Interferenz zu bringen, deren Wellenlängen
20 genau um einen Faktor von Zwei unterschieden sind. Die resultierende Interferenz besitzt eine Phase, die direkt abhängig ist vom Brechungsindex, die aber im wesentlichen unabhängig ist von der Bewegung. Das von Lis vorgeschlagene System hat jedoch den Nachteil, daß es kompliziert aufgebaut ist und ein zusätzliches BBO-Kristall für jeden Meßpfad erfordert. In der Mikrolithographie sind häufig sechs oder mehr Meßpfade erforderlich, und jenes BBO kann mehr als \$ 12 000 kosten, so daß die zusätzlichen Kristalle einen bedeutenden zusätzlichen Kostenaufwand erfordern. Ein weiterer Nachteil des Lis-Systems besteht darin, daß es ein langsames
25 (32 Hz) Phasendetektorsystem benutzt, das auf der physikalischen Versetzung eines PZT-Wandlers beruht.

Aus den obigen Ausführungen wird klar, daß im Stande der Technik kein praktikables Verfahren hoher Geschwindigkeit und hoher Präzision mit entsprechenden Mitteln vorhanden ist, um Fluktuationen im Brechungsindex von Luft zu messen und zu kompensieren. Die Beschränkungen im Stande der Technik beruhen
30 prinzipiell auf den folgenden ungelösten technischen Schwierigkeiten: (1) Bekannte heterodyne und superheterodyne Interferometer sind in ihrer Genauigkeit durch Fluktuationen im Brechungsindex von Luft begrenzt; (2) bekannte Dispersionstechniken zur Messung von Indexfluktuationen erfordern eine extrem hohe Genauigkeit in der Interferenzphasenmessung, die im typischen Fall eine Größenordnung der typischen Genauigkeit von hochpräzisen Entfernungsmess-Interferometern übersteigt; (3) naheliegende Modifikationen bekannter Interferometer zum Zwecke der Verbesserung der Phasenmeßgenauigkeit würden die Meßzeit auf eine Dauer erhöhen, die nicht kompatibel ist mit der Schnelligkeit der Bewegung in einer modernen mikrolithographischen Ausrüstung; (4) die bekannte Dispersionstechnik erfordert wenigstens zwei extrem stabile Laserquellen, oder eine einzige Quelle, die mehrere phasenstarre Wellenlängen abstrahlt; (5) bekannte Dispersionstechniken in der
35 Anwendung der Mikrolithographie sind empfindlich gegenüber einer Bewegung während der Messung, was zu Systemfehlern führt; (6) bekannte Dispersionstechniken, die Verdopplungskristalle (beispielsweise US-PS 5 404 222) als Teil des Detektorsystems benutzen, sind kostspielig und kompliziert. Diese Schwierigkeiten im Stande der Technik haben zu einem Fehlen irgendeines praktischen interferometrischen Systems geführt, das eine Versetzungsmessung für die Mikrolithographie in Gegenwart von Indexfluktuationen ermöglicht.

Zusammenfassung der Erfindung

Gemäß der vorliegenden Erfindung werden eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Messung von Fluktuationen im Brechungsindex eines Gases in einem Meßpfad geschaffen, beispielsweise für Zwecke der Distanzmessungs-Interferometrie, unabhängig von den Fluktuationen, und gemäß der Erfindung sind folgende Teile vorgesehen:
50 (1) eine Quelle von wenigstens zwei Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen, wobei die Wellenlängen eine bekannte angenäherte harmonische Beziehung zueinander oder zu einer gemeinsamen Bezugswellenlänge haben; (2) Mittel zur Einführung einer Frequenzdifferenz zwischen die beiden orthogonally polarisierten Zustände eines jeden Lichtstrahls, wobei die Frequenzdifferenz für wenigstens zwei Strahlen unterschiedlich ist; (3) optische Mittel zur Ausrichtung sämtlicher Lichtstrahlen derart, daß sie im wesentlichen durch den gleichen Meßpfad hindurchlaufen; (4) optische Mittel zur Erzeugung von phasenverschobenen Strahlen durch Einführung einer Phasenverschiebung zwischen den Polarisationszuständen von jedem der Lichtstrahlen, wobei die optischen Mittel aufweisen, um einen Mehrfach-Durchlauf über den Meßpfad für die Lichtstrahlen zu erzeugen, wobei die Zahl der Durchläufe für die jeweiligen Lichtstrahlen harmonisch bezogen sind auf eine Beziehung, die im wesentlichen die gleiche ist wie die bekannte angenäherte harmonische Beziehung zwischen
60 den Wellenlängen. Die Phasenverschiebungen der optisch produzierten Strahlen besitzen eine Größe, die proportional ist zum Produkt der Zahl der Durchläufe über den Meßpfad, wobei die physikalische Länge des Meßpfades und die Brechungsindizes des Gases im Meßpfad eine Funktion der Wellenlänge und daher unterschieden sind für jeden phasenverschobenen Strahl; (5) Mittel, vorzugsweise in Gestalt eines Polarisators, zur Mischung der Polarisationskomponenten eines jeden phasenverschobenen Lichtstrahls zur Erzeugung von zwei oder mehreren gemischten Ausgangsstrahlen; (6) Mittel, vorzugsweise in Gestalt eines photoelektrischen Detektors, um heterodyne elektrische Signale von den Intensitäten der gemischten Ausgangsstrahlen zu erlangen, wobei die heterodynen elektrischen Signale durch Schwingungen bei heterodynen Frequenzen charakterisiert sind, bezogen auf die Frequenzdifferenzen zwischen den Polarisationszuständen der Lichtstrahlen, wobei die

heterodynen elektrischen Signale außerdem durch heterodyne Phasen gekennzeichnet sind; (7) Mittel, vorzugsweise elektronischer Art, zum Mischen von jeweils zwei der heterodynen elektrischen Signale, um wenigstens ein superheterodynes elektrisches Signal zu erzeugen, das aus einem amplitudenmodulierten Träger besteht, der eine superheterodyne Modulationsfrequenz aufweist, die gleich ist der Hälfte der Differenz der beiden entsprechenden heterodynen Frequenzen, und eine superheterodyne Modulationsphase gleich der Hälfte der Differenz zwischen den beiden entsprechenden heterodynen Phasen; (8) Mittel, vorzugsweise elektronischer Art, um die superheterodyne Modulationsphase zu analysieren und die Fluktuationen im Brechungsindex des Gases über dem Meßpfad zu bestimmen.

Die Hauptvorteile der Erfindung können wie folgt zusammengefaßt werden: Wenn die Wellenlängenquellen im wesentlichen harmonisch aufeinander bezogen sind und die Phasenverschiebungen, die durch Mehrfach-Durchläufe erzeugt werden, wo die Zahl der Durchläufe in ähnlicher Weise harmonisch bezogen ist, dann liefert die Erfindung eine Überlagerungsmodulationsphase, die im wesentlichen unempfindlich gegenüber einer Bewegung ist. Diese superheterodyne Modulationsphase ist ein direktes Maß der Fluktuationen des Brechungsindex von Luft. Da die superheterodyne Modulationsfrequenz auf irgendeinen zweckmäßigen Wert eingestellt werden kann, kann die Phasenmeßgenauigkeit zur Kompensation von Indexfluktuationen in gleicher Weise verbessert werden. Diese Verbesserungen gegenüber dem Stande der Technik werden erreicht ohne teure optische Komponenten, beispielsweise Verdopplungskristalle oder dergleichen, und ohne irgendeine Beschränkung hinsichtlich der Schnelligkeit der Bewegung.

Ein abgewandeltes Ausführungsbeispiel der Erfindung umfaßt die Möglichkeit der Kompensation unerwünschter Fluktuationen in der Wellenlängenquelle, wobei zusätzliche Monitor-Interferometer benutzt werden und im wesentlichen die gleiche elektronische Verarbeitungsvorrichtung, wie sie im Primärgerät Anwendung fand. Das Monitor-Interferometer besitzt vorzugsweise eine feste Monitor-Pfadlänge mit einem sorgfältig gesteuerten Brechungsindex, so daß alle gemessenen Änderungen im Monitor beitragen und eine Messung der Wellenlängenstabilisierung liefern.

Kurzbeschreibung der Zeichnung

In der Zeichnung bezeichnen gleiche Bezugszeichen gleiche Elemente.
 Fig. 1 zeigt ein Schaltbild einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung.
 Fig. 2 ist eine graphische Darstellung, die ein Schwebungssignal darstellt,
 Fig. 3 zeigt ein Blockschaltbild der Verarbeitungselektronik,
 Fig. 4 ist ein Schaltbild einer abgewandelten Ausführungsform der Erfindung.

Einzelbeschreibung der Ausführungsbeispiele

Fig. 1 zeigt ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Messung von Fluktuationen im Brechungsindex eines Gases innerhalb eines Meßpfades 66, und eine derartige Vorrichtung ist zweckmäßig zur Messung der Versetzung eines Gegenstandes 67, unabhängig von derartigen Fluktuationen.

Gemäß einem bevorzugten Verfahren nach der Erfindung durchläuft ein Lichtstrahl 11, der von einer Quelle 1 emittiert wird, einen Modulator 2, der durch einen Treiber 3 erregt wird. Die Quelle 1 ist vorzugsweise ein Laser oder eine ähnliche Quelle kohärenter Strahlung, die vorzugsweise polarisiert ist, und der Strahl besitzt eine Wellenlänge λ_1 . Der Modulator 2 kann beispielsweise ein akustooptischer Wandler sein, oder eine Kombination eines akustooptischen Wandlers mit einer zusätzlichen Optik zur selektiven Modulation der Polarisationskomponenten des Strahls 11. Der Modulator 2 verschiebt die Oszillationsfrequenz einer linearen Polarisationskomponente des Strahls 11 um einen Betrag f_1 gegenüber einer orthogonalen linearen Polarisationskomponente, wobei die Polarisationskomponenten hierbei mit x- bzw. y-Richtungskomponenten versehen sind. Demgemäß besitzt nach Durchlaufen des Modulators 2 die x-Polarisationskomponente des Strahls 11 eine Oszillationsfrequenz, die um den Betrag f_1 gegenüber der y-Polarisationskomponente des Strahls 11 nach oben verschoben ist.

In einem nächsten Schritt durchläuft ein Strahl 12, der von einer Quelle 4 emittiert ist, einen Modulator 5, der durch einen Treiber 6 erregt wird, ähnlich dem Modulator 2 bzw. dem Treiber 3. Die Quelle 4 ist ebenso wie die Quelle 1 vorzugsweise ein Laser oder eine ähnliche Quelle polarisierter kohärenter Strahlung, aber vorzugsweise mit einer unterschiedlichen Wellenlänge λ_2 , die eine bekannte annähernde harmonische Beziehung gegenüber der Wellenlänge λ_1 hat, das heißt:

$$p_1 \lambda_2 \approx p_2 \lambda_1$$

für $p_1, p_2 = 2, 3, \dots, p_1 \neq p_2$ (1)

Nach Durchlaufen des Modulators 5 besitzt die x-Polarisationskomponente des Strahls 12 eine Oszillationsfrequenz, die um einen Betrag f_2 gegenüber der y-Polarisationskomponente des Strahls 12 verschoben ist.

Für den Fachmann ist es klar, daß die Strahlen 11 und 12 alternativ von einer einzigen Laserquelle geliefert werden können, die mehr als eine Wellenlänge emittiert, oder durch einen einzigen Laser, der mit einer optischen Frequenzverdopplungsvorrichtung versehen ist, oder durch irgendeine äquivalente Strahlungskonfiguration, die in der Lage ist, Lichtstrahlen mit zwei oder mehr Wellenlängen zu erzeugen. Es ist außerdem für den Fachmann klar, daß eine oder beide Frequenzverschiebungen f_1, f_2 das Ergebnis einer Zeeman-Aufspaltung oder einer ähnlichen Phänomencharakteristik der Laserquellen selbst sein können.

In einem nächsten Schritt breiten sich die Strahlen 11 und 12 in einem Interferometer 60 aus, das aus optischen Mitteln besteht, um eine Phasenverschiebung ϕ_1 zwischen die x- und y-Polarisationskomponenten des Strahls 11 einzuführen, entsprechend der Wellenlänge λ_1 , und eine Phasenverschiebung ϕ_2 zwischen den x- und y-Polarisa-

tionskomponenten des Strahls 12, entsprechend der Wellenlänge λ_2 . Die Größen der Phasenverschiebungen ϕ_1 , ϕ_2 sind auf eine runde physikalische Länge L des Meßpfades 66 gemäß der folgenden Formel bezogen:

$$\phi_j = (Lk_j n_j + \zeta_j) p_j \text{ für } j = 1, 2 \quad (2)$$

wobei die Wellennummern k_j gegeben sind durch

$$k_j = 2\pi/\lambda_j \quad (3)$$

und die Brechungsindices n_j des Gasmeßpfades 66 den Wellenlängen λ_j entsprechen. Die Phasenversetzungen ζ_j enthalten alle Bestandteile der Phasenverschiebungen ϕ_1 , die nicht auf den Meßpfad 66 bezogen sind. Es ist notwendig zu bemerken, daß die Koeffizienten p_1 und p_2 vorzugsweise identisch den gleich bezeichneten Koeffizienten p_1 , p_2 sind, die benutzt werden, um die annähernde harmonische Beziehung in Gleichung (1) zu definieren. In Fig. 1 ist das Interferometer 60 so ausgelegt, daß $p_1 = 1$ und $p_2 = 2$, so daß auf diese Weise die einfachste Art der Funktion der Erfindung veranschaulicht wird.

Wie in Fig. 1 dargestellt, und wie dies zu bevorzugen ist, weist das Interferometer 60 einen Bezugsspiegel 65, eine Viertelwellenplatte 81, eine Viertelwellenplatte 82, einen Polarisierungsstrahlspalter 23 und den Gegenstand 67 auf. Diese Konfiguration ist im Stand der Technik bekannt als polarisiertes Michelson-Interferometer und ist als einfache Illustration dargestellt. Ein Winkelkompensations-Interferometer oder eine ähnliche Vorrichtung, wie diese in einem Artikel "Differential interferometer arrangements for distance and angle measurements: Principles, advantages and applications" von C. Zanoni in: VDI Berichte Nr. 749, S. 93, 1989, beschrieben ist, wird vorzugsweise in die Vorrichtung nach der Erfindung eingebaut, wenn mit Entwicklungsabschnitten gearbeitet wird, die in der mikrolithographischen Fabrikation integrierter Schaltungen anzutreffen sind. Andere Formen von Interferometern, wie sie in dem obengenannten Artikel "Differential interferometer arrangements for distance and angle measurements: Principles, advantages and applications" von C. Zanoni in: VDI Berichte Nr. 749, S. 93, 1989, beschrieben sind, können in der erfindungsgemäßen Vorrichtung gemäß Fig. 1 eingebaut werden, ohne wesentlich von der Idee der vorliegenden Erfindung abzuweichen.

Eine ungewöhnliche und erfindungsgemäße Charakteristik des Interferometers 60 besteht darin, daß der Strahl 11 mit der Wellenlänge λ_1 einer Phasenverschiebung ϕ_1 unterworfen wird, die proportional ist der physikalischen Mehrfach-Länge L des Meßpfades 66 mal dem Brechungsindex n_1 , während der Strahl 12 mit der Wellenlänge λ_2 einer Phasenverschiebung ϕ_2 unterworfen wird, die zweimal so groß ist wie die physikalische Mehrfach-Länge L des Meßpfades 66 mal dem Brechungsindex n_2 . Der Strahl 12 wird demgemäß einem Doppeldurchlauf durch den Meßpfad unterworfen. Doppeldurchlauf-Interferometer sind als Mittel zur Verbesserung der Meßauflösung bekannt, wie dies beispielsweise in einem Artikel "Double-passed two-beam interferometers" von P. Hariharan und D. Sen in: J. Opt. Soc. Am. 50, 357—361 (1960), beschrieben ist. Jedoch ist die erfindungsgemäße Kombination eines Einzeldurchlaufs mit einem Doppeldurchlauf-Interferometer im gleichen System zum Zwecke der Luftturbulenzkompensation nicht bekannt und wird hier erstmalig beschrieben. Die Vorrichtung zur Erlangung einer solchen erfindungsgemäßen Kombination wird in den folgenden beiden Abschnitten beschrieben.

Gemäß Fig. 1 trennt der Polarisationsstrahlteiler 23 des Interferometers 60 die beiden x- und y-Polarisationskomponenten der Strahlen 11 und 12. Der Polarisationsstrahlteiler 23 reflektiert vorzugsweise die x-Polarisationskomponenten, während die y-Polarisationskomponenten durchgelassen werden. Daher wird die x-Polarisationskomponente des Strahls 11 als Strahl 211 durch die Viertelwellenplatte 83 geschickt, die den Polarisationszustand des Strahls 211 in eine zirkuläre Polarisation umwandelt. Nach Reflexion durch den Bezugsspiegel 65 wandelt die Viertelwellenplatte 83 den Polarisationszustand des Strahls 211 in den linearen Polarisationszustand zurück, aber die Richtung der Polarisation verläuft nunmehr längs der y-Richtung. Im wesentlichen gleichzeitig wird die y-Polarisationskomponente des Strahls 11 als Strahl 111 durch die Viertelwellenplatte 81 geschickt, die den Polarisationszustand des Strahls 111 in eine zirkuläre Polarisation umwandelt. Nach Durchlaufen des Meßpfades 66 und Reflexion vom Gegenstand 67 wandelt die Viertelwellenplatte 81 den Polarisationszustand des Strahls 111 zurück in eine lineare Polarisation, aber die Polarisationsrichtung verläuft nunmehr längs der x-Richtung. Da der Strahl 111 mit der x-Polarisationskomponente reflektiert wird und der Strahl 211 mit der y-Polarisationskomponente vom Strahl 23 durchgelassen wird, kombinieren sich beide Strahlen 111 und 211 und bilden einen phasenverschobenen Strahl 15, der aus dem Interferometer 60, wie aus Fig. 1 ersichtlich, hervortritt.

Aus Fig. 1 ist weiter ersichtlich, daß die x-Polarisationskomponente x des Strahls 12 als Strahl 212 durch die Viertelwellenlängenplatte 83 geschickt wird, die den Polarisationszustand des Strahls 212 in eine zirkuläre Polarisation umwandelt. Nach Reflexion vom Bezugsspiegel 65 wandelt die Viertelwellenlängenplatte 83 den Polarisationszustand des Strahls 212 in eine lineare Polarisation zurück, aber die Richtung der Polarisation verläuft nunmehr längs der y-Richtung. Im wesentlichen gleichzeitig wird die y-Polarisationskomponente des Strahls 12 als Strahl 112 durch die Viertelwellenlängenplatte 81 geschickt, die den Polarisationszustand des Strahls 112 in eine zirkuläre Polarisation umwandelt. Nach Durchlaufen des Meßpfades 66 und Reflexion vom Gegenstand 67 wandelt die Viertelwellenlängenplatte 81 den Polarisationszustand des Strahls 112 zurück in eine lineare Polarisation, aber die Polarisationsrichtung verläuft nunmehr in x-Richtung. Da der Strahl 112 mit der x-Polarisationskomponente reflektiert wird und der Strahl 212 mit der y-Polarisationskomponente durch den Strahl 23 übertragen wird, kombinieren sich beide Strahlen 112 und 212 und bilden einen Strahl 115, der nach einem Faltpolprisma 82 fortschreitet, das den Strahl 115 zurück zu dem Polarisationsstrahlteiler 23 richtet. Der Polarisationsstrahlteiler 23 trennt nochmals die Polarisationskomponenten des Strahls 115, und diesmal wird ein Strahl 113 erzeugt, der einen x-Polarisationszustand aufweist, und einen Strahl 213, der einen y-Polarisationszustand besitzt. Nachdem der Strahl 213 die Viertelwellenlängenplatte 83 zweimal durchlaufen hat und vom

Bezugsspiegel 65 reflektiert wurde, wird er in die x-Polarisation zurückverwandelt. In gleicher Weise wird der Strahl 113, nachdem er zweimal die Viertelwellenlängenplatte 81 durchlaufen hat und vom Bezugsspiegel 65 reflektiert wurde, zurück in den y-Polarisationszustand verwandelt. Da der Strahl 213 mit der x-Polarisationskomponente reflektiert wird und der Strahl 113 mit der y-Polarisationskomponente durch den Strahl 23 übertragen wird, werden beide Strahlen 213 und 113 kombiniert, um einen phasenverschobenen Strahl 16 zu bilden, der aus dem Interferometer 60, wie aus Fig. 1 ersichtlich ist, nach Reflexion vom Faltspiegel 84 austritt. 5

In einem nächsten Schritt durchlaufen die phasenverschobenen Strahlen 15 und 16 gemäß Fig. 1 einen Polarisator 44, der vorzugsweise so orientiert ist, daß die x- und y-Polarisationskomponenten eines jeden Strahls 15 und 16 vermischt werden. Dann treffen die Strahlen 15, 16 auf einen Photodetektor 46 bzw. einen Photodetektor 45 auf, was zu zwei Überlagerungs-Interferenzsignalen s_1 , s_2 führt, die den beiden Wellenlängen λ_1 bzw. λ_2 entsprechen und die folgende Formel besitzen: 10

$$s_j = \cos(\alpha_j(t)) \text{ für } j = 1, 2 \quad (4)$$

Dabei sind die zeitabhängigen Argumente $\alpha_1(t)$, $\alpha_2(t)$ der heterodynen Interferenzsignale s_1 , s_2 gegeben durch: 15

$$\alpha_j(t) = 2\pi f_j t + \varphi_j \quad (5)$$

und die Signalamplitude hat sich zu Eins normalisiert, und alle konstanten Versetzungswerte wurden durch elektronische Vorbehandlungsmittel (nicht dargestellt) ausgefiltert. Die Überlagerungs-Interferenzsignale s_1 , s_2 werden der elektronischen Verarbeitungsvorrichtung 98 zur Analyse zugeführt. 20

Nunmehr wird auf Fig. 3 Bezug genommen. Die elektronische Verarbeitungsvorrichtung 98 umfaßt vorzugsweise Mittel 982 zur elektronischen Addition der beiden heterodynen Signale s_1 , s_2 , um ein Überlagerungssignal S zu schaffen, das die folgende mathematische Form besitzt: 25

$$S = s_1 + s_2 \quad (6)$$

Diese kann geschrieben werden als

$$S = 2MC \quad (7)$$

wobei

$$C = \cos(2\pi \omega t + \vartheta) \quad (8)$$

$$M = \cos(2\pi Ft + \Phi) \quad (9)$$

und

$$\nu = \frac{1}{2}(f_1 + f_2) \quad (10)$$

$$\vartheta = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2)$$

$$F = \frac{1}{2}(f_1 - f_2) \quad (11)$$

$$\Phi = \frac{1}{2}(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Das superheterodyne Signal S ist deshalb ein Trägersignal C der Frequenz ν , moduliert durch ein Hüllsignal M der Frequenz F. Für den Fachmann ist es klar, daß dann, wenn die heterodynen Signale s_1 , s_2 eine unterschiedliche Amplitude besitzen, der resultierende mathematische Ausdruck komplizierter wird, aber nichtsdestoweniger kann er in Ausdrücken eines Trägersignals beschrieben werden, moduliert durch ein Hüllsignal. Der Einfachheit halber wird in der vorliegenden Beschreibung angenommen, daß die heterodynen Signale s_1 , s_2 die gleiche Amplitude aufweisen. 55

Nunmehr wird wiederum auf Fig. 3 Bezug genommen. Die elektronische Verarbeitungsvorrichtung 98 umfaßt vorzugsweise Mittel 983, um das Hüllsignal M vom Trägersignal C zu trennen, wobei eine Gleichrichtung und Filterung und weiter eine Quadrierung des Signals benutzt wird, oder irgendwelche andere Techniken, um eine Amplitudenmodulation zu extrahieren und einen Träger zu demodulieren. Die elektronische Verarbeitungsvorrichtung 98 umfaßt außerdem Mittel 985, um die Modulationsphase Φ zu bestimmen, wobei ein auf der Zeit basierender Phasendetektor oder dergleichen benutzt wird. Die elektronische Verarbeitungsvorrichtung 98 weist ferner Mittel 986 und Mittel 987 auf, um die Phasen φ_1 bzw. φ_2 zu bestimmen. 60 65

Im nächsten Schritt überträgt die elektronische Verarbeitungsvorrichtung 98 die Werte der Modulationsphase Φ und der Phasenverschiebungen φ_1 , φ_2 entweder in digitaler Form oder in analoger Form einem Computer

99. Der Computer 99 berechnet die Trägerphase Φ und berechnet den Brechungsindex unter Benutzung der folgenden Formel:

$$n_1 = 1 + \frac{A}{L} (\kappa\Phi - \chi\Phi - Q) \quad (12)$$

wobei

$$A = \frac{2\Gamma}{(\chi^2 - \kappa^2)} \quad (13)$$

$$\kappa = \frac{1}{2}(p_1 k_1 - p_2 k_2) \quad (14)$$

$$\chi = \frac{1}{2}(p_1 k_1 + p_2 k_2) \quad (15)$$

$$\Gamma = \frac{n-1}{n_2 - n_1} \quad (16)$$

Die oben definierte Konstante Γ stellt ein Maß der Dispersion des Brechungsindex der Luft dar. Wenn beispielsweise $\lambda_1 = 0,63 \mu\text{m}$ und $\lambda_2 = 0,33 \mu\text{m}$ ist, dann wird $\Gamma = 24$. Der Versetzungsfaktor Q wird wie folgt definiert:

$$Q = \kappa\xi - \chi Z \quad (17)$$

Dabei ist

$$\xi = \frac{1}{2}(p_1 \zeta + p_2 \zeta_2) \quad (18)$$

$$Z = \frac{1}{2}(p_1 \zeta - p_2 \zeta_2) \quad (19)$$

Für die gegenwärtig bevorzugte Ausführungsform der Erfindung wird Q als Konstante betrachtet, oder wird durch eine (nicht dargestellte) rein elektronische Einrichtung überwacht.

Die Größen κ und χ , die in die Gleichungen (14) bzw. (15) eingeführt wurden, werden als Vakuumüberlagerungswellennummer bzw. Vakuumträgerwellennummer bezeichnet. Diese Terminologie folgt logisch aus den folgenden Zwei-Phasen-Gleichungen, die gültig sind, wenn $n_1 = n_2 = 1$:

$$\Phi = \kappa L + \xi \quad (20)$$

$$\Phi = \kappa L + Z \quad (21)$$

Aus dem gleichen Grunde werden die Größen ξ und Z , die in die Gleichungen (18), (19) eingeführt wurden, als Vakuumträgerphasenversetzung bzw. Vakuumüberlagerungsphasenversetzung bezeichnet.

In einem Endschrift kann bei jenen Anwendungen, die sich auf eine Distanzmeß-Interferometrie beziehen, der kalkulierte Wert des Brechungsindex n_1 zusammen mit der Phasenverschiebung Φ_1 benutzt werden, um den Abstand L unabhängig von Fluktuationen des Brechungsindex n_1 zu bestimmen, indem man die Formel

$$L = \frac{\Phi_1 - \xi_1}{\kappa_1 n_1} \quad (22)$$

benutzt. Für den Fachmann ist es klar, daß ähnliche Berechnungen in bezug auf n_2 anstelle oder zusätzlich zu n_1

vorgenommen werden können.

In den obigen Abschnitten wurde ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel der Erfindung beschrieben, und die der Erfindung zugrunde liegenden Vorteile werden durch die folgende Diskussion klar. Aus der Berechnung des Brechungsindex n_1 , geliefert durch Gleichung (12), wird es klar, daß die geforderte Genauigkeit der Trägerphase ϑ und der Überlagerungsphase Φ auf die Werte der Trägerwellennummer κ und der Überlagerungswellennummer K bezogen sind. Da die Frequenz F des Modulationssignals M sehr viel kleiner sein kann als die Frequenz ν des Trägersignals C , und da es allgemein leichter ist, die Phase eines elektronischen Signals kleinerer Frequenz mit hoher Auflösung zu berechnen, ist es allgemein vorteilhaft, sich auf eine hochgenaue Messung der Überlagerungsmodulationsphase Φ zu verlassen. Dies kann bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung leicht erreicht werden, wenn die Wellenlängen λ_1, λ_2 annähernd harmonisch bezogen sind, wie dies in Gleichung (1) dargestellt ist. Für den Grenzfall, wenn λ_1, λ_2 ganzzahlige Vielfache voneinander sind, d. h. für den Grenzwert, wo

$$p_1 \lambda_2 = p_2 \lambda_1 \\ \text{für } p_1, p_2 = 2, 3, \dots, p_1 \neq p_2 \quad (23)$$

ist, ist die Vakuumüberlagerungswellennummer K gleich Null, und die Brechungsindexkalkulation umhüllt nicht die Trägerphase ϑ :

$$n_1 = 1 + \frac{A}{L} (\chi\Phi - Z) \quad \text{für } K = 0 \quad (24)$$

Für den Fall, daß $K = 0$, ist die Überlagerungsmodulationsphase Φ auch nur im geringen Maße von dem Abstand L abhängig, relativ zu der sehr weitgehenden Abhängigkeit von der Trägerphase ϑ und den Phasenverschiebungen ϕ_1, ϕ_2 . Hierdurch wird die Genauigkeit der Phasendetektion für bewegliche Gegenstände weitgehend verbessert, wie dies beispielsweise in mikrolithographischen Einrichtungen erforderlich ist.

Eine wichtige Betrachtung für die Interferometrie allgemein und für die Dispersionstechnik insbesondere ist die Wellenlängeninstabilität der Quelle. Die erfindungsgemäße Vorrichtung schafft eine zweckmäßige Möglichkeit, die Wellenlängeninstabilität der Quelle zu kompensieren, wie dies im folgenden ausgeführt wird. Durch mathematische Manipulation der Gleichung (12) wird es möglich zu zeigen, daß ein Fehler δn_1 im Brechungsindex, der auf der Instabilität der Quelle beruht, gegeben ist durch:

$$\delta n = \kappa A \delta K \quad (25)$$

Dabei ist δK die Instabilität der Vakuumüberlagerungswellennummer K . Diese Formel zeigt, daß die Größe des Fehlers im wesentlichen unabhängig ist von dem Objektabstand L und allen anderen Variablen, beispielsweise der Phasenverschiebung ϕ_1, ϕ_2 , die direkt von der Gegenstands Entfernung L abhängen. Es ist daher möglich, die Wirkungen der Wellenlängenstabilität dadurch zu kompensieren, daß der Brechungsindex längs eines Monitorpfades gemessen wird, der völlig frei ist von wirklichen Fluktuationen im Index. Sämtliche gemessenen Veränderungen sind das Ergebnis einer Wellenlängeninstabilität.

Nunmehr wird auf Fig. 4 Bezug genommen. Hier ist ein abgewandeltes Ausführungsbeispiel der Erfindung dargestellt, wobei ein Monitorsystem 60b dem Ausführungsbeispiel nach Fig. 1 hinzugefügt wurde, um einen Fehler δn_1 in der Brechungsindexmessung zu kompensieren, wobei der Fehler von der Wellenlängeninstabilität der Quelle herrührt. Ein Strahlteiler 70 und ein Spiegel 71 reflektieren einen Teil des Strahls 13 nach dem Monitorsystem 60b. Das Monitorsystem 60b umfaßt eine Zahl von Elementen, die analoge Operationen als Interferometer 60 durchführen, wobei die Elemente die gleichen Operationen durchführen wie die in gleicher Weise bezeichneten Elemente des Interferometers 60, mit dem Unterschied, daß ein Zusatz "b" zugesetzt wurde, wenn sie sich auf Elemente des Monitorsystems 60b beziehen. Ein elektronisches Monitorverarbeitungssystem 98b führt in gleicher Weise die gleichen Operationen wie das elektronische Prozessorsystem 98 durch. Die Differenz zwischen dem Interferometer 60 und dem Monitorsystem 60b besteht darin, daß der Monitorpfad 66b des Monitorsystems 60b vorzugsweise eine feste Länge mit einem genau gesteuerten Brechungsindex aufweist, was dadurch erreicht werden kann, daß der Monitorpfad 66b umschlossen wird und Temperatur und Druck des eingeschlossenen Volumens gesteuert werden. Da der Brechungsindex längs des Monitorpfades 66b im wesentlichen konstant ist, sind alle gemessenen Abweichungen δn_M im Monitorsystem verursacht durch die Wellenlängeninstabilität der Quelle. Bei diesem abgewandelten Ausführungsbeispiel der Erfindung berechnet der Computer 99 vorzugsweise den Brechungsindex n_1 gemäß der folgenden Formel:

$$n_1 = 1 + \frac{A}{L} (K\vartheta - \chi\Phi - Q) - \delta n_M \quad (26)$$

Diese erfindungsgemäße Kompensationstechnik vermindert die Wellenlängenstabilitätsanforderungen für die Quelle wesentlich. Es ist insbesondere zu bemerken, daß die Erfindung nicht eine absolute Wellenlängenstabilität erfordert und ein Monitorpfad 66b keine übermäßig genaue stabile physikalische Länge L aufweisen muß.

Die Vorteile der vorliegenden Erfindung sind die folgenden: (1) Die vorliegende Erfindung schafft eine genaue Messung bezüglich Fluktuationen im Brechungsindex von Luft und kompensiert diese, wie dies für die Distanzmeß-Interferometrie nützlich ist; (2) die vorliegende Erfindung ist kompatibel mit der schnellen Bewegung, die bei modernen mikrolithographischen Ausrüstungen erforderlich ist; (3) die vorliegende Erfindung weist zweckmäßigerweise einfach einzubauende Monitoreinrichtungen auf, und das Verfahren vermindert wesentlich die Erfordernisse der Quellenstabilität; und (4) die Vorrichtung nach der vorliegenden Erfindung ist wesentlich weniger kompliziert und weniger kostspielig als vergleichbare Vorrichtungen bekannter Art.

Für den Fachmann ist es klar, daß zusätzliche optische Elemente und elektronische Verarbeitungsstufen in die beschriebenen Ausführungsbeispiele der erfindungsgemäßen Vorrichtung einbezogen werden können. Beispielsweise könnten zusätzliche Detektoren und zugeordnete Elemente den Ausführungsbeispielen zugesetzt werden, um verschiedene Phasenversetzungen zu messen und zu kompensieren, die in der Datenverarbeitung auftreten. Diese und andere naheliegende Abwandlungen können eingeführt werden, ohne das Wesen der Erfindung zu beeinträchtigen.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Messung von Fluktuationen im Brechungsindex eines in einem Meßpfad befindlichen Gases, mit den folgenden Merkmalen: eine Quelle von wenigstens zwei Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen und einer im wesentlichen harmonischen Beziehung, wobei diese Lichtstrahlen jeweils senkrechte Polarisationszustände aufweisen; Mittel zur Einführung einer Frequenzdifferenz zwischen den orthogonal polarisierten Zuständen eines jeden der Lichtstrahlen; Mittel zum Ausrichten der Lichtstrahlen derart, daß sie durch den gleichen Meßpfad hindurchtreten; optische Mittel zur Erzeugung phasenverschobener Strahlen, wobei diese optischen Mittel eine Einrichtung aufweisen, um einen Mehrfach-Durchlauf über den Meßpfad für die Lichtstrahlen zu schaffen, wobei die Zahl der Durchläufe für die jeweiligen Lichtstrahlen harmonisch auf die Beziehung bezogen ist, die im wesentlichen die gleiche ist wie die im wesentlichen harmonische Beziehung zwischen den Wellenlängen; die Phasenverschiebungen der optisch erzeugten Strahlen haben eine Größe proportional zu dem Produkt der Zahl der Durchläufe über dem Meßpfad und der physikalischen Länge des Meßpfades und dem Brechungsindex des Gases im Meßpfad; Mittel zum Mischen der Polarisationskomponenten eines jeden der phasenverschobenen Strahlen zur Erzeugung vermischter Ausgangsstrahlen; Mittel zur Erzeugung heterodyner elektrischer Signale aus den Intensitäten der gemischten Ausgangsstrahlen, die Schwingungen mit heterodynen Frequenzen umfassen, die auf die Frequenzdifferenzen zwischen den Polarisationszuständen der Lichtstrahlen bezogen sind und heterodyne Phasen umfassen; Mittel zum Mischen von wenigstens zwei der heterodynen elektrischen Signale zur Erzeugung von wenigstens einem superheterodynen elektrischen Signal mit einem amplitudenmodulierten Träger, der eine superheterodyne Modulationsfrequenz besitzt, die im wesentlichen gleich ist der Hälfte der Differenz der zwei entsprechenden heterodynen Frequenzen, und eine superheterodyne Modulationsphase, die im wesentlichen gleich der Hälfte der Differenz zwischen den beiden entsprechenden heterodynen Phasen ist; und Mittel zur Analyse der superheterodynen Modulationsphase zur Bestimmung der Fluktuationen in dem Brechungsindex innerhalb des Meßpfades.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Lichtstrahlen jeweils zwei orthogonal polarisierte Zustände besitzen und die die Frequenzdifferenz einführenden Mittel eine Einrichtung aufweisen, um die Frequenzdifferenz zwischen den beiden orthogonal polarisierten Zuständen eines jeden der Lichtstrahlen einzuführen, wobei die Frequenzdifferenz für wenigstens zwei Strahlen unterschiedlich ist.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Mittel zum Ausrichten der Lichtstrahlen eine optische Einrichtung aufweisen, um sämtliche Lichtstrahlen so auszurichten, daß sie den Meßpfad durchlaufen.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die optischen Mittel zur Erzeugung der phasenverschobenen Strahlen eine optische Einrichtung aufweisen, um Phasenverschiebungen zwischen den Polarisationszuständen eines jeden der Lichtstrahlen einzuführen.
5. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Brechungsindizes eine Funktion der Wellenlänge sind und unterschiedliche Brechungsindizes für jeden phasenverschobenen Strahl vorhanden sind.
6. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Mittel zur Vermischung der Polarisationskomponenten einen Polarisator umfassen.
7. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Mittel zur Erzeugung der heterodynen elektrischen Signale einen photoelektrischen Detektor aufweisen.
8. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Mittel zur Vermischung von wenigstens zwei der heterodynen elektrischen Signale eine Einrichtung aufweisen, um irgendwelche zwei der heterodynen elektrischen Signale zu vermischen und um das wenigstens eine superheterodyne elektrische Signal zu erzeugen, wobei der amplitudenmodulierte Träger die superheterodyne Modulationsfrequenz aufweist.
9. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Quelle eine Quelle kohärenter Strahlung ist.
10. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Quelle ein Laser ist.
11. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher der Meßpfad in einem Interferometer liegt.
12. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher das Gas Luft ist.
13. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Mittel zur Vermischung der heterodynen Signale eine elektronische Einrichtung aufweisen.
14. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die optischen Mittel zur Erzeugung der phasenverschobenen Strahlen ein Mehrfachdurchlauf-Interferometer aufweisen.
15. Vorrichtung nach Anspruch 1, welche außerdem Mittel aufweist, um Fehler in der superheterodynen Modulationsphase zu kompensieren, die durch Fluktuationen in den Wellenlängen der Quelle erzeugt

wurden.

16. Vorrichtung nach Anspruch 15, bei welcher die Kompensationsmittel ein Interferometer aufweisen, das einen Meßpfad besitzt, der aus einem Monitorpfad fester Länge besteht, wobei das Gas einen kontrollierten Brechungsindex besitzt.

17. Vorrichtung nach Anspruch 16, bei welcher die Kompensationsmittel außerdem eine Einrichtung aufweisen, um heterodyne Monitorsignale zu erzeugen. 5

18. Vorrichtung nach Anspruch 17, bei welcher die Kompensationsmittel außerdem eine Einrichtung umfassen, um irgendwelche zwei der heterodynen elektrischen Monitorsignale zu vermischen und um wenigstens ein elektrisches superheterodynes Monitorsignal zu erzeugen, das einen amplitudenmodulierten Träger mit einer superheterodynen Monitormodulationsfrequenz hat. 10

19. Verfahren zur Messung von Fluktuationen im Brechungsindex eines Gases in einem Meßpfad, mit den folgenden Schritten: es ist eine Quelle von Lichtstrahlen vorgesehen, die Wellenlängen haben, die im wesentlichen harmonisch aufeinander bezogen sind; die Strahlen werden mehrfach durch den gleichen Meßpfad geschickt; es werden heterodyne Phasenverschiebungen eingeführt, basierend auf den vorgesehenen Quellenwellenlängen; die Zahl der Durchläufe der Mehrfach-Durchläufe ist in gleicher Weise harmonisch bezogen auf die harmonisch bezogenen Quellenwellenlängen zur Erzeugung einer superheterodynen Modulationsphase, die im wesentlichen unempfindlich gegenüber der Bewegung längs des Meßpfades ist. 15

20. Verfahren nach Anspruch 19, bei welchem das Gas Luft ist.

21. Verfahren nach Anspruch 19, bei welchem der Meßpfad einen Meßpfad in dem Mehrfachdurchlauf-Interferometer umfaßt, welches einen Abschnitt besitzt, der längs des Meßpfades beweglich ist, wobei die superheterodyne Modulationsphase einen Schritt liefert, der den Schritt der Erzeugung der superheterodynen Modulationsphase umfaßt und im wesentlichen unempfindlich gegenüber der Abschnittsbewegung in dem Meßpfad ist. 20

22. Verfahren nach Anspruch 19, mit dem weiteren Schritt der Bestimmung eines Abstands (L) längs des Meßpfades, unabhängig von den Fluktuationen im Brechungsindex (n). 25

23. Verfahren nach Anspruch 22, bei welchem der Schritt der Entfernungsbestimmung außerdem den Schritt aufweist, die Entfernung (L) gemäß dem Ausdruck

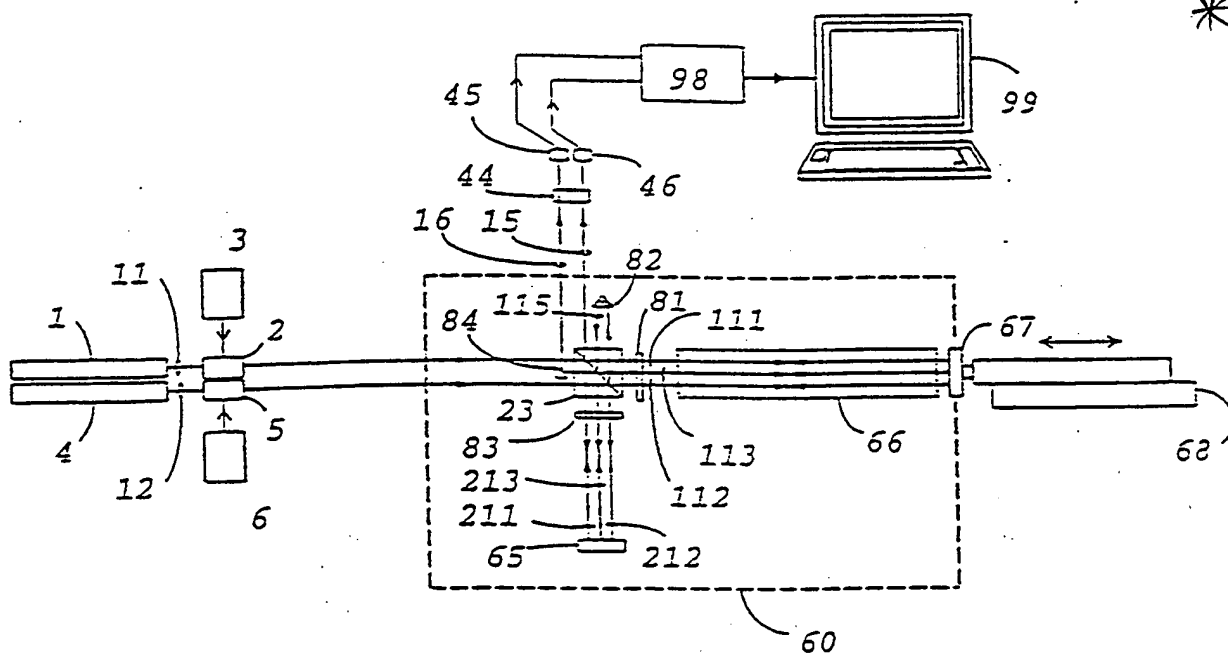
$$L = \frac{\varphi_1 - \zeta_1}{k_1 n_1}$$

zu bestimmen, wobei φ_1 gleich der Größe der Phasenverschiebung, k_1 gleich der Wellenzahl der Phasenverschiebung, n gleich dem Brechungsindex und ζ_1 gleich der Phasenversetzung ist, wobei die Phasenversetzung alle Anteile der Phasenverschiebung φ_1 umfaßt, die nicht auf den Meßpfad bezogen sind. 30

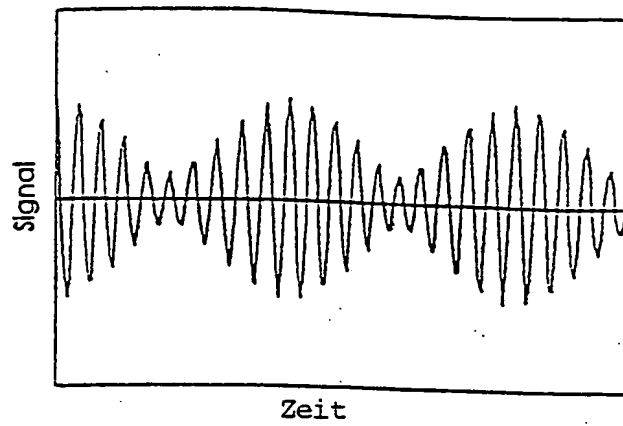
24. Verfahren nach Anspruch 19, bei welchem jeder der Lichtstrahlen orthogonale Zustände besitzt und der Schritt der Erzeugung der heterodynen Phasenverschiebungen den Schritt umfaßt, optisch die phasenverschobenen Strahlen dadurch zu erzeugen, daß Phasenverschiebungen zwischen die Polarisationszustände der Lichtstrahlen eingeführt werden, wobei die Phasenverschiebungsgröße proportional zur Zahl der Durchläufe durch den Meßpfad und umgekehrt proportional der Wellenlänge des optischen Strahls ist, proportional zur physikalischen Länge des Meßpfades und proportional zum Brechungsindex des Gases in dem Meßpfad. 35

25. Verfahren nach Anspruch 19, welches weiter den Schritt umfaßt, Fehler in der superheterodynen Modulationsphase zu kompensieren, die durch Fluktuationen in der Wellenlänge der Quelle eingeführt wurden. 40

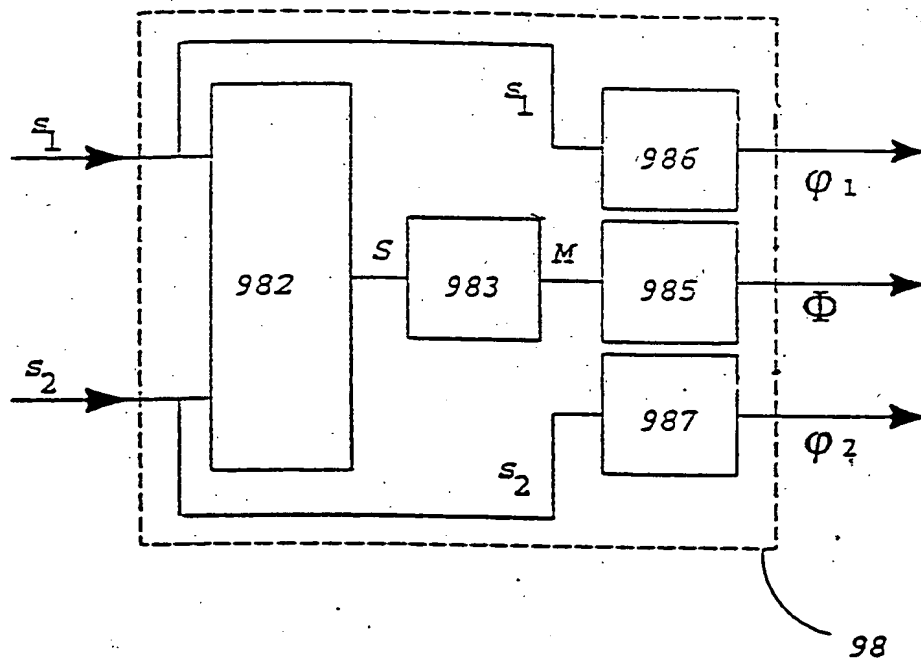
Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen 45



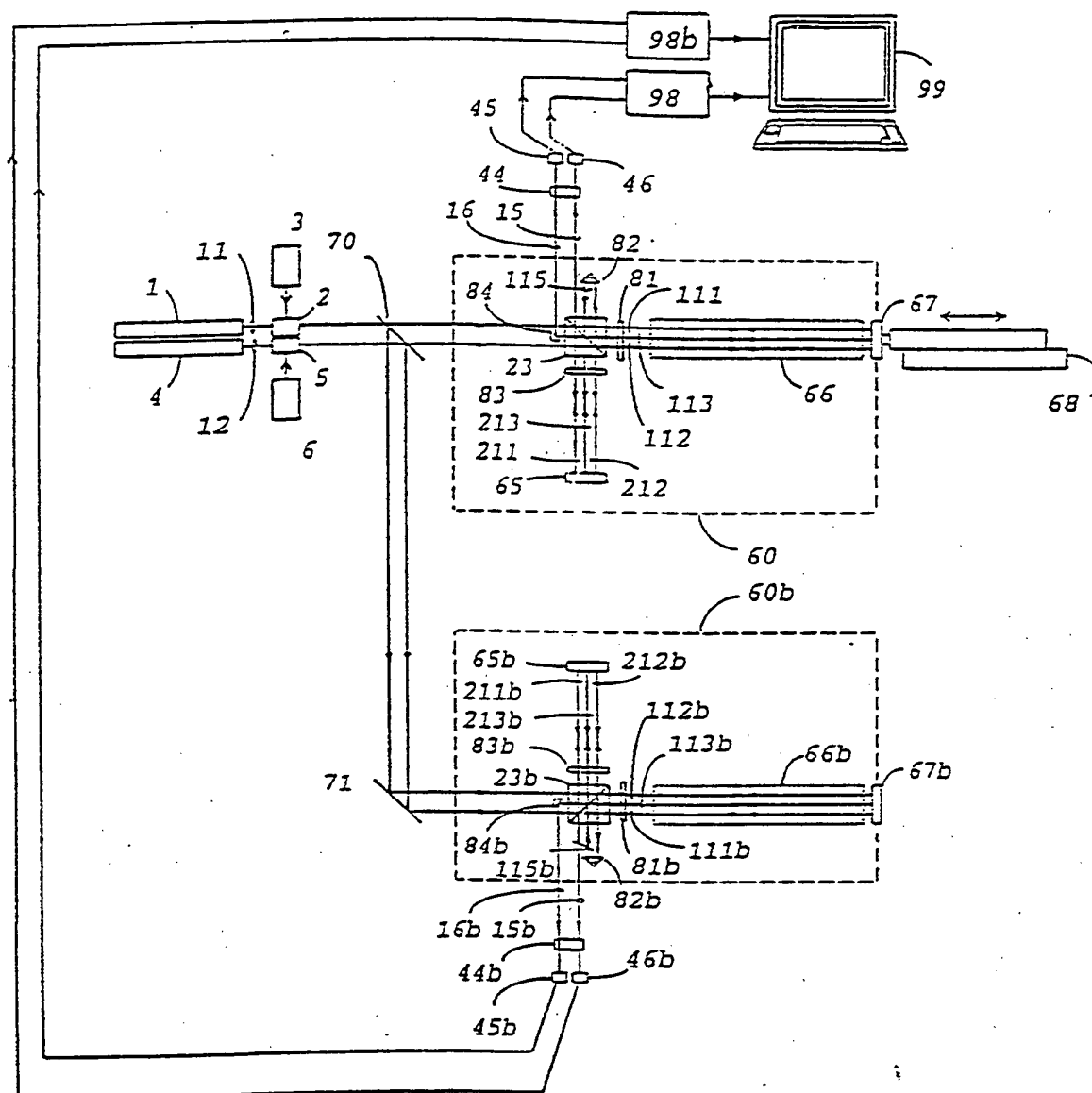
Figur 1



Figur 2



Figur 3



Figur 4